



APLICAÇÃO DO MODELO FLO-2D PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE DETRITOS NA BACIA DO RIO CUNHA, RIO DOS CEDROS/SC

Henrique Lucini Rocha¹; Masato Kobiyama²; Gean Paulo Michel³

RESUMO --- Em 2008, o município de Rio dos Cedros/SC registrou a ocorrência de diversos movimentos de massa, dentre os quais, dois fluxos de detritos. As informações referentes a estes dois fluxos foram utilizadas no desenvolvimento do presente estudo. O objetivo foi determinar o alcance da massa deslizada e avaliar os fatores condicionantes para este tipo de fenômeno. Para isso, foram realizados levantamentos do trajeto percorrido pelos fluxos, desde a ruptura até a deposição para posterior comparação com dados encontrados na bibliografia e dados de saída do modelo FLO-2D. Além disso; foi verificada a aplicabilidade e consistência dos dados gerados pelo modelo FLO-2D. O modelo FLO-2D foi calibrado e validado, apresentando um erro máximo de 118 m em termos de alcance, o que representa uma diferença de 8,22% entre o valor obtido em campo e a pior simulação. Apesar de os resultados obtidos com o modelo terem sido satisfatórios, alguns pontos de não reprodução física do fenômeno ocorreram.

ABSTRACT --- In 2008, Rio dos Cedros city, Santa Catarina state, suffered from several mass movements, among which, two debris flows were used as case study for the present study. Then, the objective of this study was to determine the total travel distance of the disrupted mass and to evaluate the conditional factors for this type of phenomenon. Field surveys were carried out in the entire debris flow path, from the failure to the deposit for comparison with data found in the bibliographic and modeled FLO-2D output. Furthermore, the applicability and consistency of data generated by the FLO-2D model were verified. The FLO-2D model was calibrated and validated where the biggest error found amongst all the simulations was of about 118 m in the total travel distance, which represents a difference of 8.22% between the value obtained in the field and the worst simulation. Despite the satisfactory results obtained with the model, some points of no physical reproduction of the phenomenon took place.

Palavras-chave: Fluxo de detritos, FLO-2D, alcance.

¹ Engenheiro, MSc. Fractal Engenharia, Rua Lauro Linhares, 2055. Florianópolis (SC). Email: rocha@fractaleng.com.br

² Professor Dr. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500. Porto Alegre (RS). Email: masato.kobiyama@ufrgs.br

³ Doutorando. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500. Porto Alegre (RS). Email: geanpmichel@gmail.com

INTRODUÇÃO

No mundo, diversos eventos de fluxos de detritos já ocasionaram mortes e grandes prejuízos econômicos. García *et al.* (2004) relataram a morte de mais de 10 mil pessoas em um evento de fluxo de detritos que atingiu a Venezuela em 1999. Além da Venezuela, outros países também vêm sendo afetados por estes fenômenos, por exemplo, Japão (JITOUSONO *et al.* 2008), Itália (BONIELLO *et al.*, 2010) e Taiwan (LEE *et al.*, 2008). No Brasil, diversos eventos vêm acontecendo ao longo dos anos, como os apresentados por Jones (1973), Lopes *et al.* (2007), Kanji *et al.* (2008), dentre outros. E, no início de 2011, a região serrana do Rio de Janeiro voltou a sofrer com desastres naturais de grande magnitude, nos quais se incluem os fluxos de detritos (FREITAS *et al.*, 2012). Kobiyama *et al.* (2010) demonstraram a importância do monitoramento dos fluxos de detritos, bem como a necessidade de se estimar o alcance da massa fluída.

Neste intuito, a propagação de dois fluxos de detritos, os quais ocorreram na bacia do Rio Cunha, município de Rio dos Cedros, em 2008, foi analisada pelo presente estudo através do modelo FLO-2D (O'Brien *et al.*, 1993). Este estudo teve o objetivo de determinar o alcance da massa deslizada e a área afetada, além de avaliar os fatores condicionantes relacionados a este tipo de fenômeno.

MÉTODOS E MATERIAIS

Área de estudo

O local de estudo é a bacia hidrográfica do Rio Cunha (16,3 km²) no município de Rio dos Cedros, SC (Figura 1). Esta bacia foi escolhida pela ocorrência de diversos fluxos de detritos em novembro de 2008. Dentre os fluxos ocorridos, dois foram analisados e nomeados de Fluxo A e B pelo presente estudo. Embora estes fluxos não tenham gerado grandes prejuízos à população, se propagaram por mais de 1 km antes de sua completa deposição. Todas as figuras apresentadas neste trabalho estão na projeção geográfica SAD69 22 S.

A Figura 2 apresenta o mapa altimétrico da bacia do Rio Cunha. Nesta bacia a altitude varia de aproximadamente 120 a 860 m, contando com regiões planas e encostas íngremes. A escala da fonte altimétrica é 1:50.000.

Levantamentos topográficos

Foram realizados diversos levantamentos em campo para caracterização dos fluxos de detritos. Durante os levantamentos foram utilizadas uma estação total Leica TPS 400 e um GPS diferencial (DGPS) Trimble R3 (L1) e 5700 (L1 e L2). Com o DGPS foram realizados

levantamentos nas áreas abertas e sem cobertura do trajeto dos fluxos, ou seja, locais em que a vegetação não afetava na qualidade do sinal. Nas bordas dos canais e em locais onde o sinal do DGPS não possuía qualidade adequada, foram levantados pontos com o uso da estação total.

A partir dos pontos levantados, o volume deslocado, volume erodido, trajeto percorrido, local de deposição e alcance foram calculados. Além disso, através da delimitação da área de abrangência dos fluxos, fez-se o reconhecimento de algumas peculiaridades. Em ambos os fluxos ocorreram formações de ilhas, ou seja, locais não afetados, por onde os detritos passaram em ambos os lados. Além das ilhas, existia uma lagoa com volume aproximado de 1.800 m³ e profundidade média de 3 m próximo ao final do Fluxo A. Estes dados complementares foram utilizados durante as simulações a fim de melhor reproduzir o evento ocorrido.

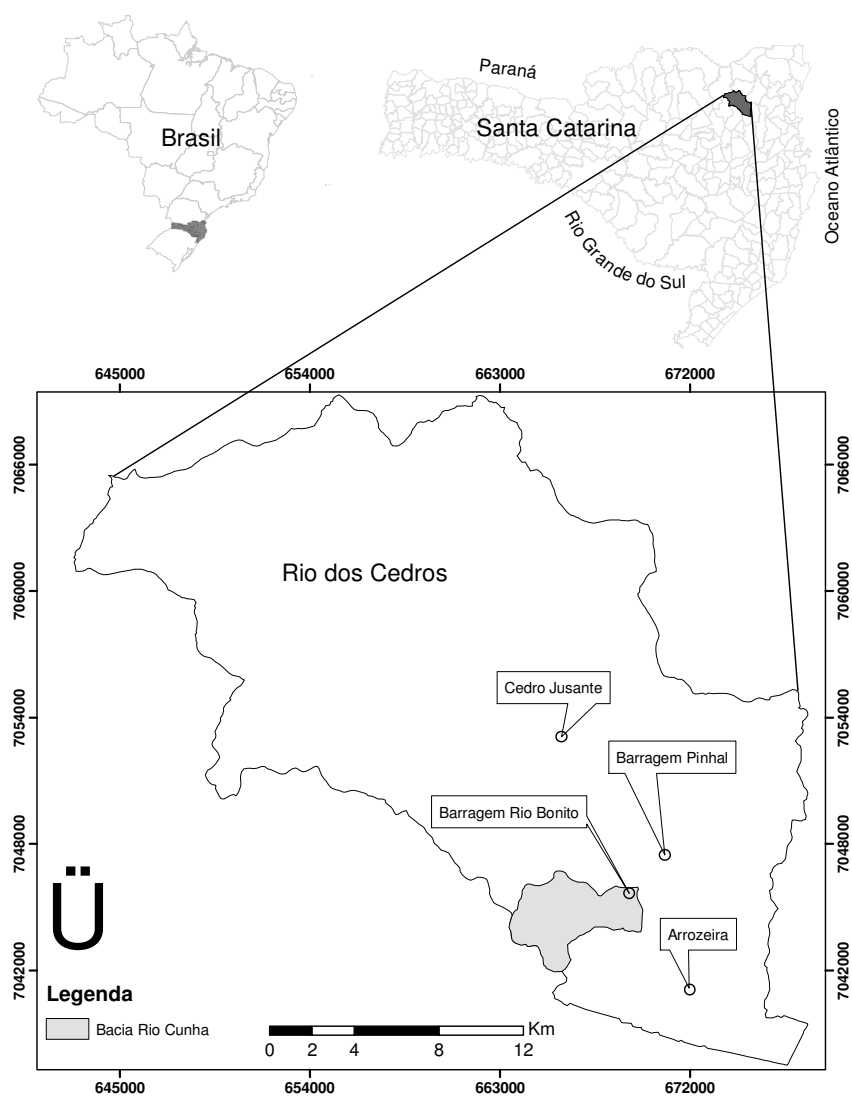


Figura 1 – Localização geográfica da bacia do Rio Cunha com indicação das estações meteorológicas utilizadas neste estudo.

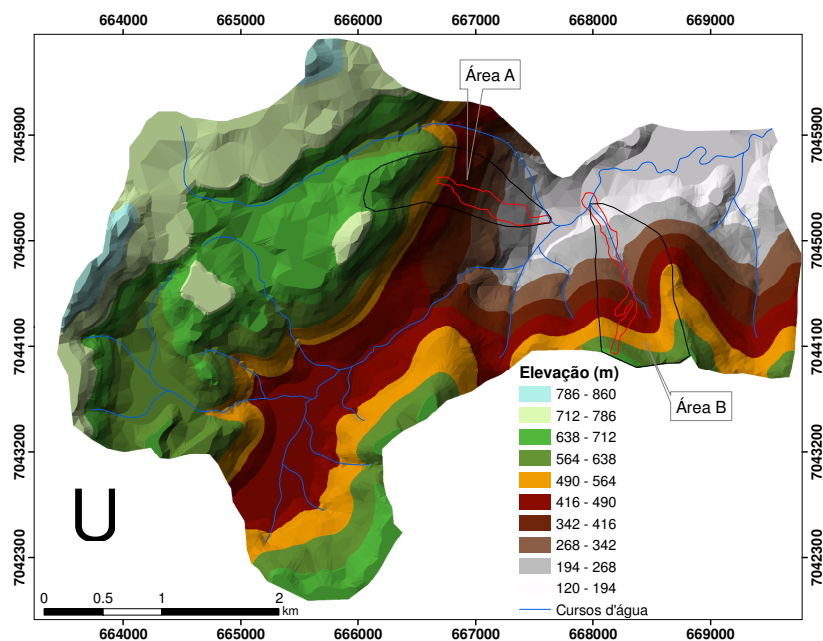


Figura 2 – Mapa altimétrico com indicação das cicatrizes dos fluxos de detritos.

Na Figura 3 são apresentados os pontos levantados em campo, situados dentro da bacia do Rio Cunha, com a indicação da lagoa, o ponto de coleta (PRC4) para análise do solo.

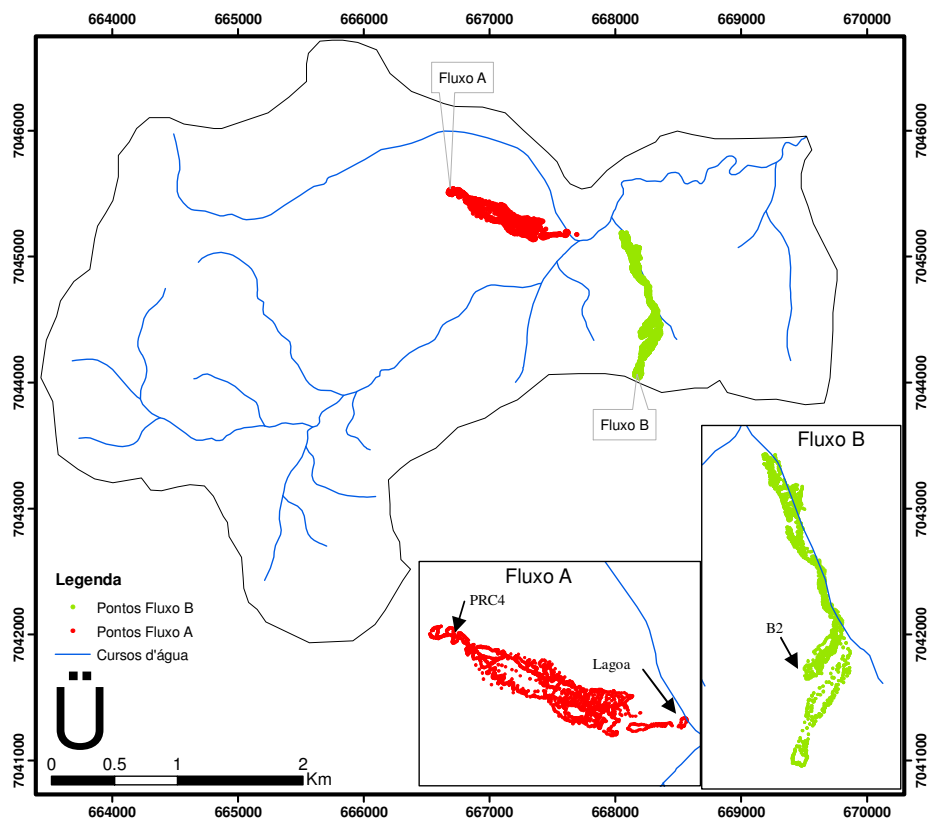


Figura 3 – Levantamento em campo: mapa da bacia do Rio Cunha com indicação dos pontos levantados em campo e da lagoa.

Hidrograma de entrada

Após estimar o volume total deslocado em cada fluxo, foi necessário transformá-lo em um hidrograma para ser utilizados no modelo. Como método de estimativa dos hidrogramas, adotou-se o hidrograma com formato triangular, baseado na metodologia apresentada por Whipple (1992). Nestes hidrogramas o tempo de ascensão é menor que o tempo de recessão o que representa bem a disponibilidade de material de um fluxo de detritos. Além disso, o tempo total de duração do hidrograma é curto, também com o intuito de reproduzir o fenômeno de maneira mais adequada.

O formato triangular já vem sendo aplicado para simulação de fluxos de detritos como verificado em D'Agostino e Tecca (2006), Gentile *et al.* (2008), dentre outros. Como não foi possível realizar análises durante o acontecimento dos fluxos de detritos para determinar a vazão de pico, foram aplicadas as equações empíricas (1) a (8) apresentadas na Tabela 1 com a concentração volumétrica variando de 0,2 a 0,65. Com a vazão de pico estimada, a variação da concentração volumétrica estabelecida e o formato do hidrograma adotado, foram criados os hidrogramas de entrada para as simulações. Vale ressaltar que estes hidrogramas sofreram alterações com relação a valores, já que foram utilizados para transportar o valor de volume total deslocado para cada fluxo e deveriam se enquadrar aos limites computacionais impostos pelo modelo.

Tabela 1 – Equações empíricas para estimar vazão de pico

Autores	Equação	
Forti (1920)	$Q_p = A \left(2,35 \frac{500}{A+125} + 0,5 \right)$	(1)
Rickenmann (1999)	$Q_p = 0,1.M^{5/6}$	(2)
Mizuyama <i>et al.</i> (1992)	$Q_p = 0,135.M^{0,78}$	(3)
Mizuyama <i>et al.</i> (1992)	$Q_p = 0,0188.M^{0,79}$	(4)
Jitousono <i>et al.</i> (1996)	$Q_p = 0,00558.M^{0,831}$	(5)
Jitousono <i>et al.</i> (1996)	$Q_p = 0,00135.M^{0,870}$	(6)
Costa (1988)	$Q_p = 0,293.M_w^{0,56}$	(7)
Costa (1988)	$Q_p = 0,0163.M_w^{0,64}$	(8)

onde Q_p é a vazão de pico (m^3/s); A é a área da bacia (km^2); M é volume total deslocado (m^3); e M_w é volume de água (m^3)

Simulações com FLO-2D

As simulações com o FLO-2D necessitam de dados topográficos, reológicos além do hidrograma para reproduzir os eventos de fluxos de detritos. Para facilitar a compreensão do funcionamento e utilização do modelo, as etapas de entrada de dados são demonstradas na Figura 4.

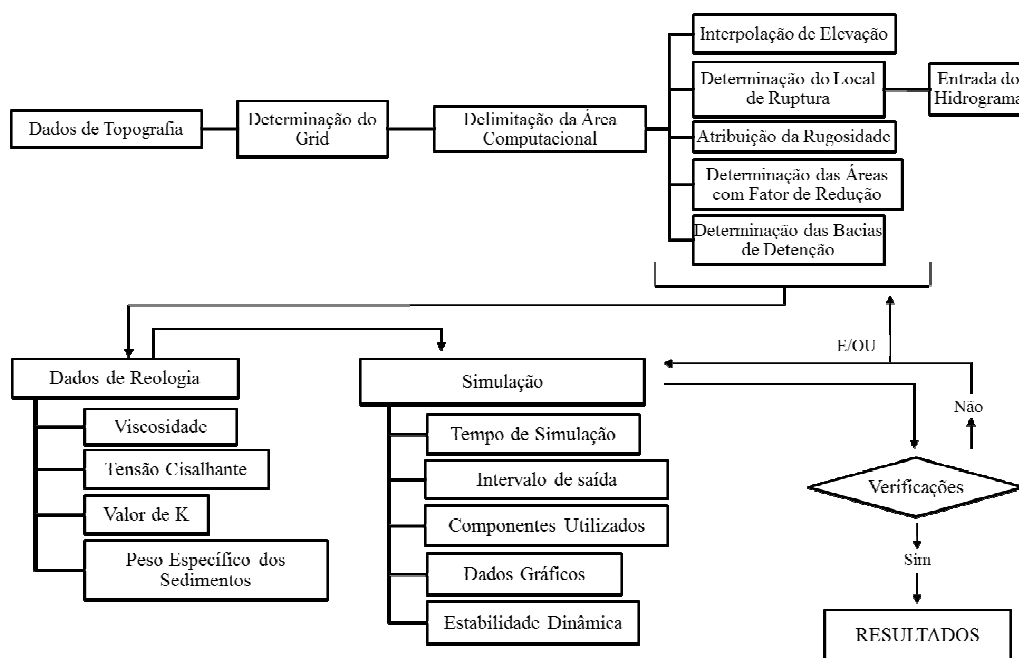


Figura 4 – Fluxograma com passos realizados para simulação com modelo FLO-2D.

Inserção do hidrograma, rugosidade do canal, concentração volumétrica e resistência ao fluxo laminar

Após a criação do grid (10 e 20 m) sobre a área a ser simulada, foram identificadas as células que correspondiam ao local de início do fluxo, ou seja, situadas sobre a área de ruptura. A estas células foram atribuídos os hidrogramas de entrada. Estes hidrogramas consideram a carga líquida, mais a carga de sedimentos, estimada através da concentração volumétrica, de modo que o volume total de sedimento fosse igual ao estimado por Kobiyama *et al.* (2010), acrescido do valor estimado de erosão sofrida pelo canal. Para propagar o volume de cada fluxo de detritos, foi variada a concentração volumétrica de sedimento conforme a variação da vazão para que no final o valor simulado de volume correspondesse ao volume total propagado para cada fluxo. Além de propagar o volume total obtido, os hidrogramas apresentam dois picos, um menor inicial e um maior posterior acrescido em uma hora de simulação. Esta medida foi tomada após diversas conversas com moradores locais que constatarem a ocorrência de um pequeno escorregamento inicial seguido de um movimento maior. Esta hipótese é válida, já que uma pequena instabilidade facilitaria a desestabilização e ruptura de uma área maior.

Foi variada também a concentração volumétrica de sedimentos (C_v) com o valor de vazão apresentado nos hidrogramas. Esta hipótese se baseia na ocorrência de uma frente mais úmida, ou

seja, com maior presença de água, como um fluxo de lama de grande mobilidade; seguida de um corpo rochoso com maior presença de detritos; e posteriormente a calda novamente mais úmida.

O valor de coeficiente de Manning foi uniformemente atribuído para toda a área computacional por se tratar de um terreno com predominância de floresta, como pode ser verificado na Figura 5. Baseado em valores obtidos por Chow (1959) e FLO Engineering Inc (2009) foi adotado um valor igual a 0,35 para ambos os fluxos de detritos, o que representa o valor médio de rugosidade obtido em locais com vegetação densa.



Figura 5 – Imagem aérea nos locais de ocorrências.

Baseado em valores propostos por FLO Engineering Inc (2009) com relação ao parâmetro de resistência ao fluxo laminar (K), foi adotado um valor igual a 10.000. Este valor foi obtido após testes de calibração, tomando como hipótese a conformação que levasse a ocorrência de bons resultados. FLO Engineering Inc (2009) recomendou o valor de $K=2.285$ para um evento de fluxo de lama que ocorreu em uma região urbana. Como as características do canal e da região onde ocorreram dos fluxos A e B trazem a presença de florestas, com elevada rugosidade, atribuiu-se também um elevado valor para K .

Em algumas simulações foram delimitadas as ilhas formadas pela propagação dos fluxos. Para definir estes locais no processo de modelagem, foi utilizada a ferramenta de Fator de Redução de área. Como nestes setores o fluxo passou pelas laterais, as áreas foram completamente bloqueadas obrigando o fluxo a se dividir, assim como verificado em campo. Essa hipótese foi adotada na tentativa de reproduzir os pontos de deposição próximos às ilhas.

Dados de reologia

O presente trabalho não realizou análise de viscosidade e tensão cisalhante de amostras dos locais de ocorrência. Sendo assim, os valores utilizados foram os obtidos por O'Brien (1986) conforme a Tabela 2. Segundo O'Brien e Julien (1988), a tensão cisalhante e a viscosidade são obtidas por uma função exponencial. Com os valores propostos por O'Brien (1986) foi realizada a calibração do modelo, escolhendo a melhor opção reológica para a bacia do Rio Cunha.

Tabela 2 – Valores das constantes reológicas encontrados na bibliografia.

Local	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$ (dynes/cm ²)		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$ (poises)	
	α	β	α	β
	Dados de Campo			
Aspen Pit 1	0,181	25,7	0,0360	22,1
Aspen Pit 2	2,72	10,4	0,0538	14,5
Aspen Natural Soil	0,152	18,7	0,00136	28,4
Aspen MineFill	0,0473	21,1	0,128	12,0
Aspen Watershed	0,0383	19,6	0,000495	27,1
Aspen Mine Source Area	0,291	14,3	0,000201	33,1
Glenwood 1	0,0345	20,1	0,00283	23,0
Glenwood 2	0,0765	16,9	0,0648	6,2
Glenwood 3	0,000707	29,8	0,00632	19,9
Glenwood 4	0,00172	29,5	0,000602	33,1

Fonte: O'Brien (1986)

Dados finais para simulação

Finalizado o passo anterior, foram atribuídos os dados finais necessários para a simulação. Nesta etapa foi determinado: (i) o tempo computacional de simulação; (ii) o intervalo de saída, ou seja, o intervalo no qual o modelo salva os dados nos arquivos de saída; (iii) os componentes a serem utilizados para simulação, tanto processos físicos envolvidos como componentes locais e hidráulicos; (iv) caso o operador solicite a saída de dados gráficos durante a simulação, os parâmetros como intervalo de atualização e os tipos de dados; e (v) os dados de estabilidade dinâmica do modelo, para determinação do intervalo computacional. Para o item (v), encontram-se o coeficiente de Courant (C); o coeficiente de estabilidade dinâmica (ζ); a tolerância de alteração de altura; e a altura mínima de sedimento.

A Tabela 3 apresenta os valores atribuídos aos parâmetros do modelo para a simulação de ambos os fluxos de detritos. Os quatro últimos parâmetros apresentados são responsáveis por manter a estabilidade numérica durante a simulação. Estes valores foram adotados por realizarem as simulações sem apresentar problemas e com baixo dispêndio de tempo computacional.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados nas simulações com o FLO-2D.

Parâmetro	Unidades	Fluxo A	Fluxo B
Tempo de Simulação	h	4,5	5
Intervalo Computacional	min	1,2	1,2
Coeficiente de Manning	m ^{-1/3} s	0,35	0,35
Densidade dos grãos	g/cm ³	2,72	2,72
Coeficiente de resistência em fluxo laminar	ad	10.000	10.000
Coeficiente de Courant	ad	0,6	0,6
Altura mínima de sedimento	m	0,1	0,1
Coeficiente de estabilidade dinâmica	ad	1	1
Tolerância de alteração de altura	%	20	20

Calibração do modelo

Para calibração do modelo foram testados diversos valores das constantes reológicas apresentadas por O'Brien (1986) encontradas na Tabela 2. Foram comparados o alcance da massa, a área inundada, o perímetro, o fator de forma (K_f) e o índice de compacidade (K_c) da área inundada:

$$K_f = \frac{A_a}{L^2} \quad (9)$$

$$K_c = \frac{0,28P}{\sqrt{A_a}} \quad (10)$$

onde A_a é a área inundada (m²); e P é o perímetro da área molhada (m).

Foi calculada a diferença percentual entre os valores obtidos nas simulações com os dados medidos em campo no Fluxo A. Para a escolha da melhor calibração adotou-se o critério de menor erro percentual com relação ao alcance da massa, já que os outros critérios somente foram adotados para fins de comparação. O fator de forma e o índice de compacidade foram utilizados, já que um deslizamento pode apresentar diversas formas com relação a sua área inundada.

Determinado qual conjunto de constantes reológicas melhor reproduziu o alcance e características de área inundada no Fluxo A, foi verificada a validação destes dados através da simulação e comparação com os valores do Fluxo B. Para as simulações de calibração foram considerados o *grid* com 10 m de aresta, com a presença das ilhas encontradas em campo e da lagoa que havia no trajeto do Fluxo A.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa de volume total dos fluxos

Para determinação do volume total de sedimentos para ambos os fluxos foram considerados os volumes estimados nos locais de ruptura acrescidos dos volumes de erosão dos canais. Com o volume total de sedimentos, foi considerada a hipótese de uma concentração volumétrica de 50%, o que facilitaria a obtenção do volume total transportado. Com isso basta-se duplicar o valor total de sedimentos para se obter o volume total transportado para cada fluxo.

Segundo os moradores locais a altura de deposição logo após os eventos foi de 6 a 11 m em ambos os fluxos. Com estes valores, estimou-se uma magnitude de volume total transportado na casa de 300.000 m³ para o Fluxo A (Área de deposição com aproximadamente 50.000 m²) e 250.000 m³ para o Fluxo B (Área de deposição apresentada na Figura 6). Com isso partia-se com uma magnitude aproximada de volume total transportado para cada fluxo, o que justifica a simplificação de 50% de concentração volumétrica de sedimentos.

Para determinação do volume erodido, foi estimado um valor de altura erodida durante a passagem do fluxo B baseada em medições de altura de deposição (Figura 6). Com uma altura de deposição média gerada a partir das medições em campo, atribuiu-se este valor para toda a área de deposição. Multiplicando-se a altura pela área de deposição estimou-se o volume de sedimentos transportado. Estimando-se uma altura média de deposição de 2,5 m, obteve-se um volume aproximado de 75.000 m³ de sedimentos depositados. Como estas medições de altura de deposição foram realizadas após aproximadamente 2 anos do ocorrido, parte do sedimento já foi erodido e transportado, sendo assim decidiu-se adotar este valor como o referente ao valor produzido somente por erosão. Desta forma dividindo-se este volume pela área de erosão do Fluxo B obtém-se a altura de erosão com aproximadamente 1,6 m, sendo arredondado para 1,5 m. Encontrado o valor de altura de erosão para o Fluxo B, foi adotado o mesmo valor para o Fluxo A, pois as áreas apresentam as mesmas características geológicas e geomorfológicas.

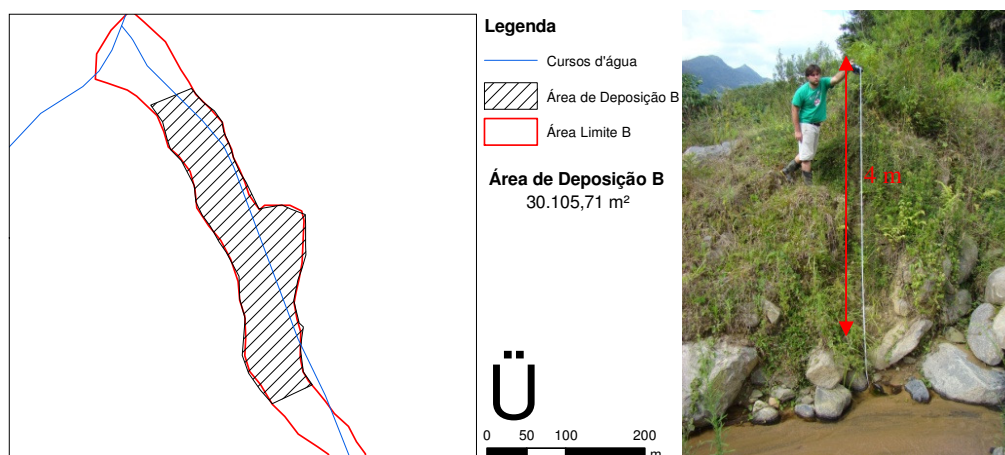


Figura 6 – Estimativa de volume total de sedimentos para o Fluxo B.

Sendo assim, a Tabela 4 apresenta algumas características relacionadas à erosão e sedimentação.

Tabela 4 – Volumes estimados de erosão causada pela passagem do fluxo de detritos.

	A_e (m ²)	h_e (m)	M_e (m ³)	M_i (m ³)	M_s (m ³)	L_t (m)	$\bar{E}$ (m ³ /m)
Fluxo A	69.565	1,5	104.347	55.915	160.263	1.061	98,39
Fluxo B	46.736	1,5	70.104	61.336	131.441	1324	52,96

Obs.: A_e é a área de erosão; h_e é a altura erodida; M_e é o volume total erodido; M_i é o volume inicial de ruptura baseado em Kobiyama *et al.* (2010); M_s é o volume total de sedimentos; L_t é o alcance (igual à distância total percorrida); e $\bar{E}$ é a taxa de erosão média no percurso.

Hidrograma de entrada

Para geração dos hidrogramas, foram aplicadas as equações de vazão de pico (1 a 8) apresentadas na Tabela 1. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Vazões (m³/s) de pico estimadas com 8 equações para Fluxos A e B.

Equação	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
A	1362	3874	2660	420	209	83	9	34	1081
B	1416	3284	2279	359	178	70	9	30	953

Com estes valores, foi calculado o valor médio para ser adotado como vazão de pico do hidrograma de entrada preliminar de ambos os fluxos. Além disso, adotou-se para os tempos inicial

e final, vazão igual a zero por ser uma condição de contorno do modelo, e, para o primeiro e penúltimo minuto vazão igual a 0,1 m³/s. Baseado nos hidrogramas apresentados por Whipple (1992), adotou-se que a vazão de pico ocorreria no quinto minuto de simulação para que a ascensão tivesse menor duração que a recessão. O passo seguinte foi gerar dois hidrogramas consecutivos separados em uma hora. Este intervalo de uma hora foi determinado através de uma análise preliminar de simulação onde o objetivo era que a massa desestabilizada anteriormente já estivesse depositada. Esta etapa foi realizada tomando como base a hipótese de uma pequena desestabilização inicial, para posterior movimento de grandes proporções. Para isto, a primeira onda foi obtida tomando como hipótese uma relação direta e igual a 10% dos valores da segunda onda. Este valor de 10% é apenas um dado simbólico para representar uma pequena desestabilização, já que no final não representará grandes valores de deposição.

Como foram verificados dois pontos de ruptura em cada fluxo, há 4 hidrogramas (A1, A2, B1 e B2) com 2 ondas cada, e com a variação da concentração volumétrica com relação à vazão, ou seja, quanto maior a vazão, maior a concentração de sedimentos. Para o fluxo A, foi adotada a hipótese de produção de detritos na ruptura A2 equivalente a 10% do montante produzido em A1, baseado nos levantamentos de campo. Já para o fluxo B, o volume transportado na ruptura B1 é de 40% do valor transportado em B2, também baseado nos valores de volume obtidos nos locais de ruptura. Além da diferença de volume, o início de ambas as rupturas também foi separado em meia hora. Este valor foi adotado para que a parte da massa da ruptura anterior já não estivesse mais em movimento quando ocorresse a desestabilização e início do movimento seguinte. Este valor de 30 minutos também foi obtido após uma análise preliminar para dar garantia da deposição da massa deslizada anteriormente. No fluxo A, foi observado em campo que a ruptura se deu primeiro em A1 e depois em A2. Já para o fluxo B a ruptura ocorreu primeiramente em B2. Estas diferenças são importantes para a reprodução das características das deposições, bem como para o alcance da massa deslizada.

Ao tentar simular os hidrogramas com os valores de vazão média apresentados na Tabela 5, o modelo apresentou erro e foi finalizado, pois gerava-se uma altura de escoamento acima do limite computacional (>100 m). Como primeira tentativa, para solucionar esse problema, foram divididos os hidrogramas em dois. Desta forma, com vazões divididas à metade, foram utilizadas duas células de *grids* em cada ponto de ruptura. Com esta configuração o modelo finalizou sua simulação, mas transportando o volume total muito acima do estimado (>900 mil m³ para o Fluxo A, por exemplo). Para acertar este valor, foi feita uma relação direta entre valor simulado com o valor total estimado. Esta relação foi multiplicada a cada valor de vazão dos hidrogramas divididos em dois obtendo-se

assim o hidrograma final para simulação. A Figura 8 apresenta o hidrograma B2, onde pode ser visto a variação da vazão, o intervalo entre o início dos hidrogramas e a variação da concentração volumétrica no tempo.

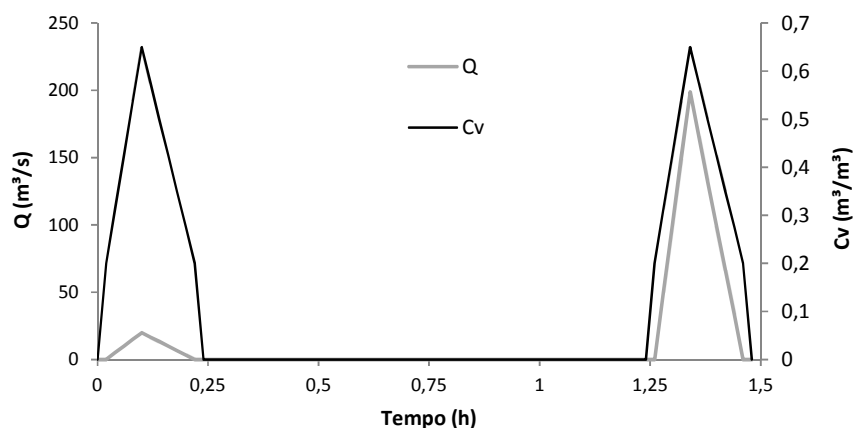


Figura 8 – Hidrograma B2 e a variação da concentração volumétrica com o tempo.

Por fim, a metodologia aplicada para geração dos hidrogramas está condizente com a metodologia aplicada por Rickenmann *et al.* (2006), tanto na geometria triangular, quanto na magnitude da vazão de pico (centenas de m^3/s). Além disso, o hidrograma apresenta um curto intervalo de duração, o que melhor representa um fenômeno de fluxo de detritos.

Calibração do modelo

Para calibração foram realizadas simulações com as constantes reológicas apresentadas na Tabela 2. Como critério de aceitação, foi realizado teste para que durante as simulações, os detritos não interceptassem os limites computacionais estabelecidos. Com isso, apenas os resultados obtidos com as características reológicas em *Aspen Mine Source* (a), *Aspen Natural Soil* (b) e *Aspen Pit 1* (c) passaram neste teste.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos após as simulações. Além disso, a Figura 9 demonstra o resultado espacial da deposição final dos detritos simulados no Fluxo A.

Tabela 6 – Caracterização das áreas da ocorrência obtida pela simulação com FLO-2D para o Fluxo A: (a) características; (b) comparação com o medido em campo.

(a)					
Local	Área (m ²)	Perímetro (m)	Alcance (m)	K_f	K_c
Campo	120.241	2.319	1.061	0,11	1,87
Aspen Natural Soil	242.687	2.587	1.145	0,22	1,47
Aspen Pit 1	158.968	2.203	1.033	0,15	1,55
Aspen Mine Source	227.023	2.455	1.092	0,19	1,45
(b)					
	Diferença Percentual			Diferença	
<i>Aspen Natural Soil</i>	101,83	11,57	7,97	0,11	-0,40
<i>Aspen Pit 1</i>	32,21	-4,98	-2,61	0,04	-0,32
<i>Aspen Mine Source</i>	88,81	6,28	2,95	0,08	-0,42

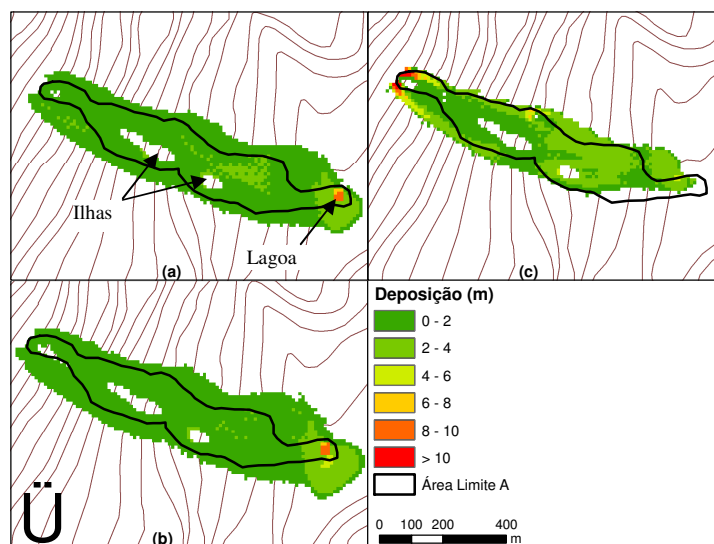


Figura 9 – Resultados da deposição e áreas limites simuladas para o Fluxo A com as reologias: (a) *Aspen Mine Source*; (b) *Aspen Natural Soil*; e (c) *Aspen Pit 1*.

Como o critério para escolha da melhor característica reológica foi o alcance da massa, ficou-se com duas opções que apresentaram resultados muito semelhantes; a *Aspen Mine Source* e *Aspen Pit 1* (2,95 e 2,61%, respectivamente). Então, optou-se por realizar as simulações de validação do fluxo B com ambas as opções reológicas a fim de confirmar qual se comporta melhor para a bacia do Rio Cunha. Nota-se que para a reologia (a) e (b) ao final da deposição ocorre um espalhamento dos detritos. Isto ocorre, pois a partir da base utilizada, nas regiões próximas aos leitos do rio formam-se planícies com a mesma elevação. Este tipo de resultado demonstra a necessidade de

MDTs de maior precisão quando o intuito é melhor reproduzir este tipo de fenômeno, já que conforme verificado em campo o terreno ainda apresentava desníveis e a formação de pequenos canais com cursos d'água nestas regiões de deposição (Figura 9). Nesta figura, observa-se também a presença das ilhas utilizadas nas simulações, bem como a presença da lagoa. Estas variações topográficas foram usadas na calibração como forma de reproduzir o verificado em campo.

Simulações com o FLO-2D

Determinadas as duas opções de características reológicas procedeu-se para as simulações de validação do fluxo B. Nestas simulações foram realizados testes variando o grid em 10 e 20 m de aresta e também o bloqueio ou não das células que representavam as ilhas encontradas em campo. A Figura 10 apresenta os resultados de simulação utilizando o *grid* de 10 m (a e b) e 20 m (c e d) e as reologias de *Aspen Pit 1* e *Aspen Mine Source*.

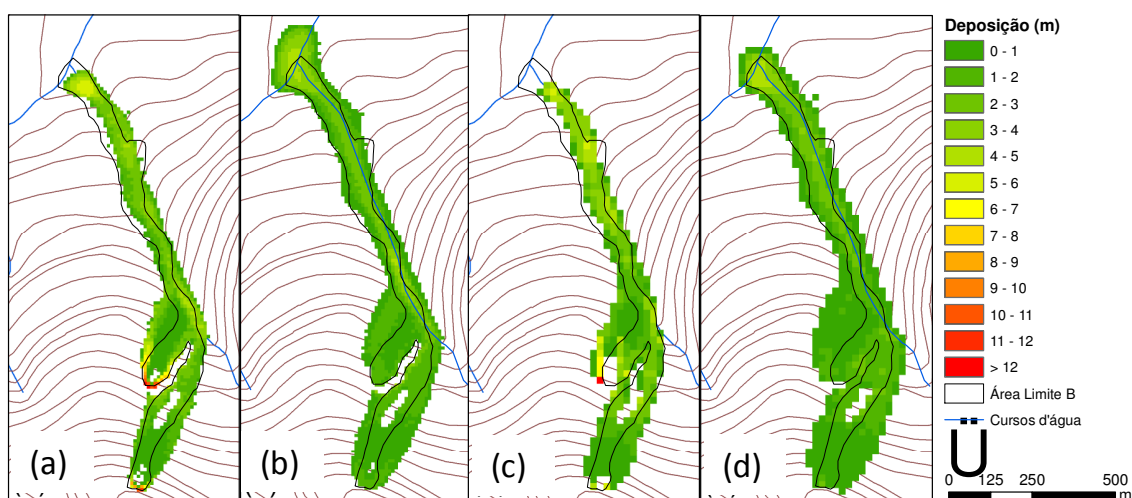


Figura 10 – Mapa de deposição e área inundada simuladas para o Fluxo B com as reologias de (a) *Aspen Pit 1*; (b) *Aspen Mine Source*. Grid:10m. (c) *Aspen Pit 1*; (d) *Aspen Mine Source*. Grid:20m.

Mais uma vez ambos os resultados obtiveram as mesmas características de deposição com relação ao caminho percorrido e área limite, mas a reologia de *Aspen Pit 1*, quando o *grid* apresenta aresta de 10 m, é a que melhor se enquadra, dentre as reologias testadas, para reprodução de fluxos de detritos na bacia do Rio Cunha. Este resultado pode ser confirmado conforme diferença percentual apresentado na Tabela 6 e Tabela 7. Ao compararmos somente a diferença percentual entre a distância percorrida, verifica-se que a reologia *Aspen Mine Source* apresenta os menores erros. Apesar disso, esta reologia tem a tendência de aumentar o percurso da massa deslizada.

Tabela 7 – Valores de alcance obtidos durante etapa de validação com as reologias testadas.

Local	<i>Grid</i> 10 (ilha)	<i>Grid</i> 10	<i>Grid</i> 20 (ilha)	<i>Grid</i> 20
Campo			1.437 m	
Mine Source	1.528 m	1.531 m	1.454 m	1.452 m
Pit 1	1.392 m	1.392 m	1.322 m	1.319 m
			Diferença Percentual	
Mine Source	6,3%	6,5%	1,2%	1,0%
Pit 1	3,1%	3,1%	8,0%	8,2%

De maneira geral, é necessário ressaltar que além das propriedades reológicas dos detritos, os fatores topográficos, como a localização dos pontos de ruptura são cruciais para a descrição do fenômeno, pois o modelo simula o percurso do fluxo a partir da localização da célula de *grid* de entrada. Além dos locais de ruptura, um maior detalhamento da topografia, através de dados altimétricos mais precisos, também iria influenciar na descrição do trajeto percorrido pela massa deslizada. Mesmo assim, notam-se bons resultados mesmo com os dados altimétricos gerados com curvas espaçadas de 20 em 20 metros e escala da fonte de 1:50.000.

Não foi possível gerar os dados de deposição detalhados já que os levantamentos de campo necessitam de bastante tempo e foram realizados durante um longo período, em um intervalo de poucos meses cerca de um ano e sete meses após o ocorrido, causando assim alterações significativas nas características de deposição. Isto pode ser observado na Figura 11 onde são apresentadas fotos tiradas de quase mesmo ângulo, mas em dias diferentes que demonstram esta modificação.



Figura 11 – Alteração das características de percurso e deposição verificadas no Fluxo B: (a) 29/01/2009; (b) 07/06/2010.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao proceder às simulações no modelo FLO-2D ficou evidenciado a não reprodução, em parte, do fenômeno físico envolvido no fluxo de detritos. Esta conclusão parte da não reprodução da erosão da massa que será transportada, nem a reprodução das velocidades e tempo de percurso. Entretanto, o modelo conseguiu obter bons resultados quanto ao alcance e descrição do trajeto dos fluxos analisados, mesmo partindo de uma informação altimétrica de baixa precisão.

O erro percentual do alcance para os valores calibrados não superou 10% para ambos os grids utilizados (10 e 20 m). Este erro representou uma subestimativa do alcance em 118 m quando utilizado o *grid* com aresta de 20 m e a reologia proposta por O'Brien (1986) para *Aspen Pit* 1. Ao analisar os *grids* de 20 m de aresta ocorreu uma inversão na melhor reologia proposta, com *Aspen Mine Source* apresentando erro percentual na casa de 1% (~ 18 m). Stolz e Huggel (2008), ao analisarem fluxos ocorridos na Suíça, afirmaram que para um *grid* de 25 m ocorre apenas a descrição do caminho, com extrapolação da área afetada e erro de deposição. Os resultados para a bacia do Rio Cunha são condizentes com relação à área afetada, mas apresentam melhor precisão com relação ao alcance. Sendo assim, ambos os grids podem ser utilizados para representar fluxo de detritos em bacias com características semelhantes à bacia do Rio Cunha, quando o modelo FLO-2D já possuir os demais parâmetros calibrados e as informações altimétricas em escala 1:50.000 ou melhor.

Desta forma, a metodologia para definição da área afetada pode ser replicada em grande parte do Brasil ao analisarmos os dados de topografia disponíveis. Ao associar a simulação hidrodinâmica da massa deslizada com a modelagem para identificação de locais de ruptura com ferramentas como SHALSTAB, SINMAP, dentre outros, têm-se uma metodologia fisicamente embasada para o mapeamento de áreas de perigo para o gerenciamento de risco associados a movimentos de encostas.

BIBLIOGRAFIA

- BONIELO, M.A.; CALLIGARIS, C.; LAPASIN, R.; ZINI, L. (2010) *Rheological investigation and simulation of a debris-flow event in the Fella watershed*. Natural Hazards and Earth System Sciences 10, pp.989-997.
- CHOW, V. T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill. New York, 680 p.

COSTA, J. E. (1988) Floods from dam failures, In: Baker, V.R. *et al.* (eds), *Flood Geomorphology*, John Wiley & Sons, New York, pp.439–463.

D'AGOSTINO, V.; TECCA, P.R. (2006) Some considerations on the application of the FLO-2D model for debris flow hazard assessment. In: Lorenzini, G.; Brebbia, C.A.; Emmanouloudis, D. (Ed.) *Monitoring, simulation, prevention and remediation of dense and debris flow*. Southampton, Boston, pp.159-170.

EVANS, S.G.; TTUBALINA, O.V.; DROBYSHEV, V.N.; CHERNOMORETS, S.S.; MCDUGALL, S.; PETRAKOV, D.; HUNGR, O. (2009) *Catastrophic detachment and high-velocity long-runout of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002*. *Geomorphology* 105, pp.314-321.

FLO Engineering Inc. (2009) *Reference Manual Version 2009*. 63p.

FORTI, A. (1920). Elementi per la progettazione delle piene catastrofiche nei corsi d'acqua montani. *Annali del Consiglio Superiore delle Acque* 2–3, pp.55–74.

FREITAS, C.M.; CARVALHO, M.L.; XIMENES, E.F.; ARRAES, E.F.; GOMES, J.O. (2012) *Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência – lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na Região Serrana, Brasil*. *Ciência & Saúde Coletiva* 179(6), pp.1577-1586.

GENTILE, F.; BISANTINO, T.; LIUZZI, G.T. (2008) *Debris-flow risk analysis in south Gargano watersheds (Southern-Italy)*. *Natural Hazards* 44, pp.1-17.

JITOUSONO, T., SHIMOKAWA, E., TSUCHIYA, S. (1996), Debris flow following the 1994 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia, *J. Jap. Soc. Erosion Control Eng.* 48 (Special Issue), pp.109–116.

JITOUSONO, T.; SHIMOKAWA, E.; TERAMOTO, Y. (2008) *Debris flow induced by deep-seated landslides at Minamata city, Kumamoto prefecture, Japan in 2003*. *International Journal of Erosion Control Engineering* 1, pp.5-10.

JONES, F.O. (1973) *Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras Escarpment, Brazil*. Geological Survey Professional paper 697, 42p.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; CORRÊA, G.P.; MICHEL, G.P. (2010) Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects. In: De Wrachien, D.;

Brebbia, C.A. (Eds.) Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III. pp.77-88.

LEE, C.-C.; KU, D.-Y.; HSU, S.-M.; CHANG, Y.-L.; CHI, S.-Y. (2008) A case study on the occurrence of regional debris flow hazard in central Taiwan. In: De Wraichen, D.; Brebbia, C.A.; Lenzi, M.A. (Eds.) Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II. pp.135-144.

KANJI, M.A.; CRUZ, P.T.; MASSAD, F. (2008) *Debris flow affecting the Cubatão oil refinery, Brazil*. Landslides 5, pp.71-82.

LOPES, E.S.S.; RIEDEL, P.S.; BENTZ, C.M.; FERREIRA, M.V.; NALETO, J.L.C. (2007) Inventário de escorregamentos naturais em banco de dados geográficos – análise dos fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão – SP. In XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, INPE, Anais, pp.2785-2796.

MIZUYAMA, T., KOBASHI, S., OU, G. (1992) *Prediction of debris flow peak discharge*. Prox. Int. Symp. Interpraevent, Bern, Switzerland, BD, Proceedings. 4, pp.99-108.

O'BRIEN, J.S. (1986) *Physical processes, rheology and modeling of mudflows*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado. (PhD dissertation).

O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y. (1988) Laboratory analysis of mudflow properties. Journal of Hydrological Engineering 114(8), pp.877-887.

O'BRIEN, J.S.; JULIEN, P.Y.; FULLERTON, W.T. (1993) *Two-dimensional water flood and mudflow simulation*. Journal of Hydrological Engineering 119(2), pp.244-259.

RICKENMANN, D. (1999) *Empirical Relationships for debris flows*. Natural Hazards 19, pp.47-77.

RICKENMANN, D.; LAIGLE, D.; MCARDELL, B.W.; HÜBL, J. (2006) *Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events*. Computational Geosciences 10, pp.241-264.

SEGATO, M.; MAO, L.; COCCATO, M.; LENZI, M.A.; D'AGOSTINO, V. (2006) *Operative approaches for debris flow modelling and hazard assessment, Lares watershed, Valle d'Aosta, Italy*. In: Lorenzini, G.; Brebbia, C.A.; Emmanouloudis, D. (Eds.) Monitoring, simulation, prevention and remediation of dense and debris flow. Southampton, Boston, pp.171-179.

STOLZ, A.; HUGGEL, C. (2008) Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM *grid* size on modeling results. *Landslides*, 5, p.311-319.

TECCA, P.R.; ARMENTO, C.; GENEVOIS, R. (2006) Debris flow hazard and mitigation works in Fiames slope (Dolomites, Italy). In: Lorenzini, G.; Brebbia, C.A.; Emmanouloudis, D. (Ed.) Monitoring, simulation, prevention and remediation of dense and debris flow. Southampton, Boston, p.15-25.

WHIPPLE, K.X. (1992) *Predicting debris-flow runout and deposition on fans: The importance of the flow hydrograph*. IAHS Publ. 209, pp.337-345.